

北部九州の冬季気象条件に基づく人工降雨実験 の実施判断基準について

CRITERIA FOR CONDUCTING CLOUD SEEDING EXPERIMENT BASED ON
WINTERTIME WEATHER CONDITIONS IN NORTHERN KYUSHU

西山浩司¹・岩井真央²・神野健二³・脇水健次⁴・遠峰菊郎⁵

Koji NISHIYAMA, Mao IWAI, Kenji JINNO, Kenji WAKIMIZU and Kikuro TOMINE

¹正会員 博(工)九州大学 助教 工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²正会員 九州大学 修士1年 工学府都市環境システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 工博 九州大学 教授 工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 博(農)九州大学 助教 農学研究院生産環境科学部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵非会員 理博 防衛大学校 教授 応用科学群地球海洋学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

Based on the pattern recognition of climatology of local weather and precipitation inherent in northern Kyushu using Self-Organizing Map, this study gave significant criteria for judging whether winter-time cloud seeding experiment should be conducted, considering the existence of suitable clouds for cloud seeding and airplane safety to be protected from lightning.

Main results are given as follows; It should be noted that the cloud seeding be conducted by fully considering wind direction of seasonal wind that can enhance the occurrence of cumulus clouds because the blocking effect of the Korean Peninsula on seasonal wind suppresses the thickness of cumulus cloud formed in the Genkai Sea, which is the most important index for artificial effects of cloud seeding. Moreover, it should be paid attention to cold air intrusion in upper layers causing lighting that affects the safety of experimental airplane, although it is not so frequent in northern Kyushu.

Key Words : cloud seeding, Self-Organizing Map, seasonal wind, cumulus cloud, cold air intrusion

1. はじめに

人工降雨が開始されて半世紀以上経過した現在, 将来の水資源確保を目指して, 世界各国で人工降雨の研究が推進されている。この分野の研究を推進していく上で, 世界気象機関(WMO)は, a) 長期間の実験を通して得られた統計的に有意な人工効果を, b) モデル, 雲物理観測, 室内実験などの物理的手法に基づいて厳密に検証することを推奨している^{1) 2)}。しかし, 過去の大規模人工降雨プロジェクトでは, 降水システムが十分把握されていないこと, 解析や観測の方法に問題があることなどから不確定性を多く含み^{3) 4)}, 人工効果の評価方法は確立されていない。また, 人工効果のシグナルが自然の変動に比べて小さいことも評価を難しくする。そのような問題のため, 現在でも, 安定的に水資源を確保するほどの実用化には至っていない。従って, 今後の研究推進のために, 新技術, 詳細な雲モデルの活用などを含め, 如

何に工夫するかが大きな課題である。

一方で, WMOは, 計画の準備段階として, 対象領域の気象条件と降水特性を十分把握し, 人工降雨に適した条件を調査する必要性を伝えている²⁾。これは, 実施計画を立案する出発点となることから, その規模に関わらず, 最初に行うべき最も重要な調査研究項目である。さらに踏み込んだ人工降雨実施の具体的な運用では, 対象となる地域の気象条件に合わせて, 費用の効率的使用や, 航空機を利用する場合の安全性などを十分考慮した計画を立案する必要がある。しかし, 前段落で述べた人工降雨分野の根幹となる研究報告は非常に多いにも関わらず, 人工降雨実施に備えて, 対象となった地域の気象条件と降水特性を考察した報告^{5) 6)}は少ない。

そこで, 本研究では, これまで人工降雨実験を実施してきた北部九州を対象として, 最初に, i) パターン認識手法の一つである自己組織化マップ⁷⁾を用いて, 冬季気象条件のパターン分類を行い, どのような気象条件で, どのような降水が発生しているか調べる。次に, ii) 以

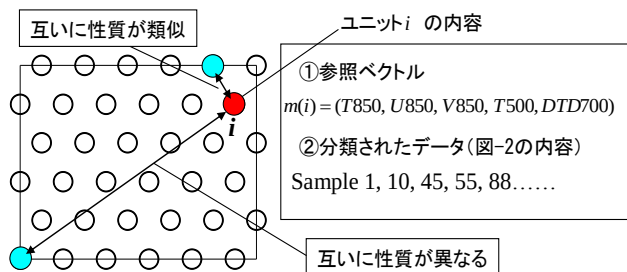


図-1 36個（縦6×横6）のユニットからなるマップの例。
マップ上の○がユニット、即ち、パターンを表す。
各ユニットの内容は、参照ベクトルと分類されたデータから構成される。

上の分類結果と、過去に実施された人工降雨実験時の気象状態を対比することによって、航空機の安全性と冬季の筋雲の存在を考慮に入れた人工降雨実験の実施判断の指針について考察する。

2. 冬季の人工降雨実験の実施理由

冬季の代表的な西高東低の気圧配置では、低温・乾燥の季節風が日本海を通過する際、対馬海流から蒸発した大量の水蒸気が凝縮し、積雲列が形成される。この積雲列（筋雲）からの大量の降水は、日本海側の冬季における貴重な水資源となる。著者らの実験⁹⁾や、気象庁のプロジェクト⁹⁾では、主に、この水資源を効率よく確保することを目的に実施されてきた。

本研究では、北部九州を対象に選んで実験を実施してきた。その理由として、冬型の気圧配置時に発生する積雲の厚さが、その他の日本海側の地方に比べて、1km程度と薄いことから、その雲物理過程や付随する力学過程が比較的扱いやすいことが挙げられる。また、この程度の厚さでは、自然の降水が不活性な場合が多いと考えられるため、人工の種蒔による効果が強く現れることが期待できることも理由として挙げられる。

しかし、過去の実験では、風向きに依存して筋雲が朝鮮半島によって遮断されることがあり、玄界灘上の雲が数百m程度の厚さ（自然でも人工でも降水が期待できない厚さ）しかない状況に悩まされた。逆に、寒気の流入が強く、自然でも十分降水が起こりうる3km以上の厚さの雲が存在することもあった。従って、人工降雨実験の実施を適切に判断するためには、北部九州の地域性を十分に考慮し、北部九州の特徴的な気象条件のパターンと降水特性との関係を十分整理しておく必要がある。

3. 解析手法

(1) 自己組織化マップ

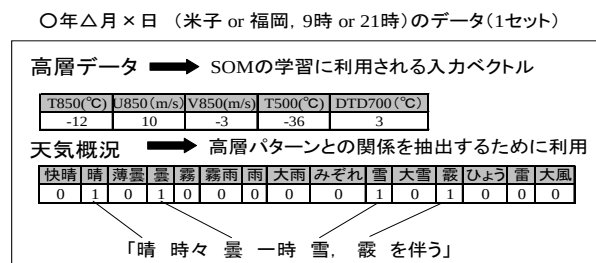


図-2 1セットのデータ構成（高層データと天気概況のデータ）。高層データはSOMの学習に利用され、天気概況は学習によって生成された高層パターンと対応させるために利用する。

本研究では、冬季の気象条件のパターン分類を行うために、自己組織化マップ（SOM：Self-Organizing Map）⁷⁾を適用する。この手法は、非線形かつ多次元のデータが示す複雑なパターンを2次元のマップ上に射影して、視覚的に理解しやすくすることを目的として開発された手法で、現在、その応用範囲は多岐にわたっている。そのアルゴリズムについては、他の文献^{10), 11)}に詳しく記載されているので省略するが、ここでは、学習によって得られたマップの解釈（図-1）について述べておく。マップ上には、○で示す座標が定義され、ユニットと呼ばれる。各々のユニットは、SOMの繰返し学習によって最終的に得られた1つのパターンを表している。その内容を見ると、類似したデータ（図-2の構成）が分類されており、ユニットを特徴づける参照ベクトルも含まれている。参照ベクトルは、入力ベクトルと同じ次元数を持ち、SOMの学習によって得られる最も重要な指標である。その意味は、ユニットに含まれる入力ベクトルの代表的な特徴を示すものと解釈される。マップの特徴を捉える際のポイントは、ユニット間の相対的な位置の違いからパターンの類似性と異質性を判断することである。即ち、互いに類似する特徴を持つユニットはマップ上で近接し、異なるユニットは相対的に遠くに位置する。

(2) 使用データ

本研究では、高層データのパターン分類のために、福岡と米子における気象庁高層観測データ（1日2回の観測）を使用する。冬期を1～3月と12月（年間4ヶ月分）として扱い、1998年12月から2008年3月までの欠測を除く合計4717個のデータ（福岡と米子の合計）をSOMの学習に利用する。尚、米子の高層データを使用する理由は、一般的な冬型の気象・降水特性を持っている米子と、朝鮮半島による筋雲の遮断効果を受けやすい福岡を比較することによって、人工降雨の対象となる九州北部が持つ降水の地域性を具体的に把握するためである。

今回、SOMによるパターン分類に使用する気象要素（5変数）として、a) 降雪の目安（ -6°C ）を判断するための850hPa面（約1500m）の気温（T850）、b) 朝鮮

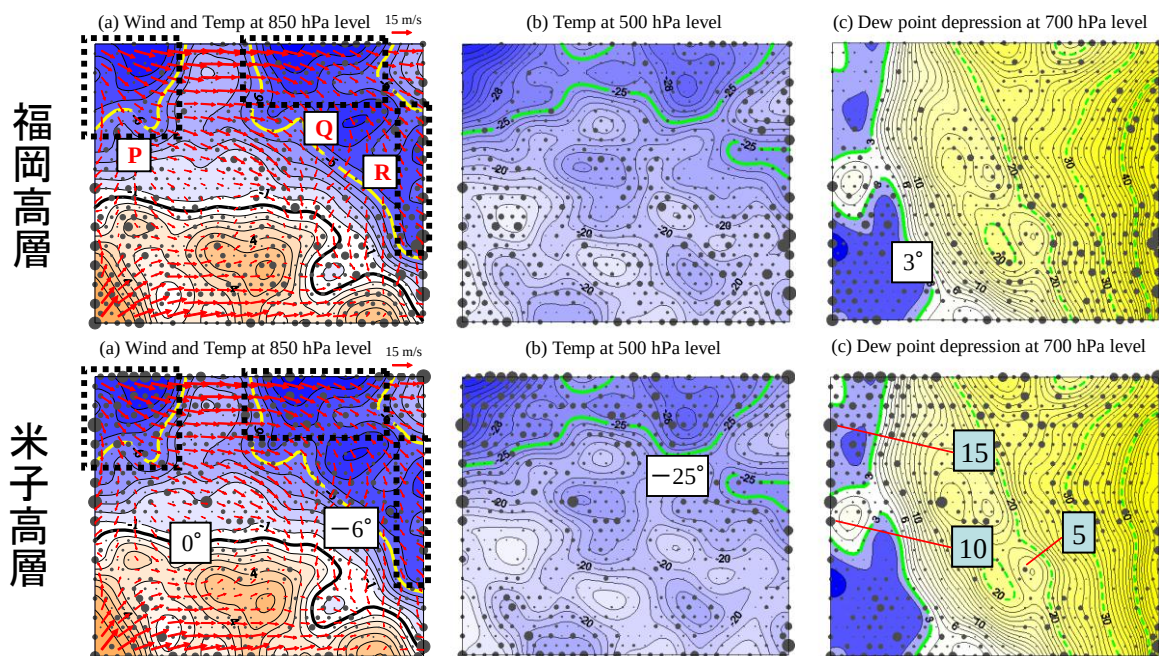


図-3 マップ上に表現した高層パターンの分布（参照ベクトルの各要素のコンターライン）と各ユニットを特徴付ける高層パターンの発生頻度（上段：福岡高層，下段：米子高層）．尚，高層パターンの発生頻度の目安を右下図に四角で示す．P, Q, Rの範囲は，本研究で議論される冬型の気象条件の範囲を示す．各図の高層パターン；(a) 850hPa層の風(m/s)と気温(°C)，(b) 500hPaの気温(°C)，(c) 700hPaの湿数

半島の影響を判断するための風ベクトルの東西(U850)・南北成分(V850)を選択する．さらに，上空に強い寒気の流入によって安定層（逆転層含む）が解消されて雲が厚くなる効果を見るために，c) 700hPaの湿数(DTD700)，d) 500hPaの気温(T500)を選択する．尚，湿数（単位：°C）とは，その数字が大きくなるほど乾燥する量で，最小値の0は湿度100%に対応する．

以上の変数を用いて分類された高層パターンを，福岡と米子の降水特性との比較のために使用する．但し，冬季の降水量は少なく，雪が降っても0mmとして扱われる場合が多く，気象条件と降水特性との関連が不明瞭になる．そこで，本研究では，降水量の代わりに，目視観測で得られる昼(6~18時)と夜(18時~翌日6時)の2回の天気概況を利用して，降水特性に関するデータセットを構築し，各々，9時と21時の高層データと対応させた．降水特性に関するデータを次のように構築する．例として，「晴時々曇一時雪，霰(アラレ)を伴う」のように表現されている場合を考える．最初に，それぞれの天気要素・降水要素を取り出す．この場合，晴，曇，雪，霰の4つである．そこで，図-2のように，これら4つの要素には1を与え，その他(雹，雷，大雪，みぞれ，霧など11要素)には0を与える．従って，SOMのマップ上の，あるユニットに分類されたデータを全て取り出した場合，学習に用いられなかった天気要素と降水要素も含まれているため，0と1の情報から，ユニット(高層パターン)ごとの各降水，各天気の頻度を計算することができる．

4. 結果

(1) 福岡と米子における冬期の気象及び降水特性

本研究では，SOMを適用して，冬季の福岡と米子の高層データを分類し，縦30，横30の合計900のユニット(パターン)からなる1つのマップを構築する．そのマップに表現された高層パターンと，それに対する降水特性を把握して，福岡と米子の降水特性の相違を明らかにする．図-3に，高層パターン(参照ベクトルの要素：850hPaの気温と風，500hPaの気温，700hPaの湿数)の分布と，それらに対応する福岡(上段)と米子(下段)の高層パターンの発生頻度に示す．ここで使われる高層パターンの分布とは，参照ベクトルがマップ上のユニットの座標ごとに得られる性質を利用して，各要素のコンターラインをマップ上に描いたものである．一方，図-4に，地域(福岡，米子)別に，高層パターンに対する雪，霰(みぞれ)，霰・雷の発生頻度を示す．ここでは，冬型の気象条件に着目して考察するので，地上の気温が0度近くにある場合が多いことを考慮し，雨の頻度の代わりに，霰の頻度を使う．これ以降，850hPa，700hPa，500hPaを下層，中層，上層と呼び，それらの層の代表的な気圧面として扱う．

最初に，マップ上に現れた高層パターンの全体的な特徴(図-3)について述べる．西高東低の気象条件を見る際の重要な点は，雪の発生の目安である，-6度以下の

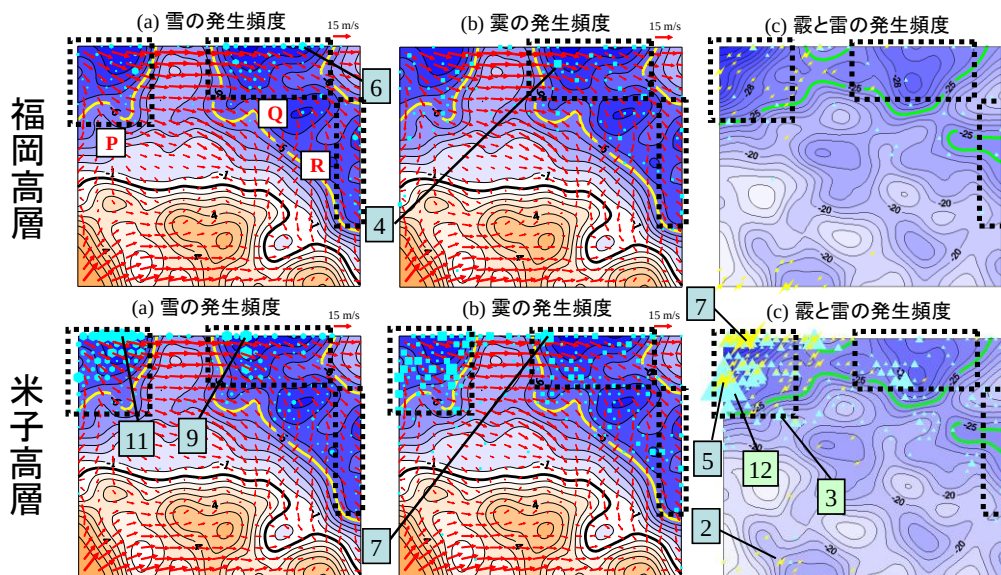


図-4 マップ上の高層パターンに対応する各降水要素（雪，霽，霰）と雷の発生頻度．雪と霽の発生頻度に対する高層パターンとして，850hPaの気温と風を，霰・雷の発生頻度に対しては，500hPaの気温を描いた．尚，各降水要素の発生頻度の大きさに関する目安を各図に示す．各図の発生頻度；(a) 雪，(b) 霽，(c) 霰（三角）と雷

表-1 マップ上の範囲P，Q，Rに対する高層パターン，雨，霽，霰，雷の発生頻度（福岡と米子）．

地点	マップ上の範囲	高層パターン	雪	霽	霰	雷
福岡	P	115	42	28	15	17
	Q	203	76	40	7	2
	R	187	19	9	3	0
米子	P	355	200	132	130	61
	Q	317	124	83	44	3
	R	87	12	19	10	0

空気の流れ具合を確認することである．そのパターンは、-6度（黄色の実線）以下の低温領域が示すように、マップ右上の広い範囲と左上の狭い範囲に存在する（図-3a）．前者は、中層で乾燥し、雲が薄くなる状況（図-3c），後者は、上層で寒気の流入による大気的不安定化で中層が湿潤化し、雲が厚くなる状況（図-3b, c）を示す．いずれの範囲も北風と西風の成分が卓越しており、西高東低の冬型の気圧配置と関連したパターンであることが伺える．一方、マップ左下の領域は、気温が高く、南風成分が卓越しているため、下層の暖気移流と関係するパターンであると考えられる．

以上に基づき、冬型の特徴的な高層パターンに対応する降水特性について考察する．ここでは、下層の-6度（黄色の実線）以下の領域に着目して、図-3, 4の範囲P, Q, Rの高層パターンを扱い、それらの範囲に対応する、福岡と米子の高層パターン、雪、霽、霰、雷の発生頻度を表-1に示す．

最も特徴的な降水特性は、雪・霽の頻度だけでなく、霰・雷の頻度も多くなる、マップ左上の範囲Pに現れる

（図-4c）．この範囲の高層パターンは、米子の気象条件で顕著に現れ、米子よりも南側の福岡で頻度が少ない（表-1）．この範囲は、強い西北西～西の風が卓越する状況下、中層湿潤、上層の強い寒気流入のパターンを示し、大気的不安定化による対流活動（雲内の上昇気流）の活発化に伴って、雲が厚くなる状況が推測される．この状況は、雲粒が豊富に供給されて、霰が発生しやすい環境¹²⁾を示している．一方、全層にわたって低温であるため、雲の上部に氷晶が多く生成される．この際、落下速度の小さい氷晶が上部に留まって、比較的大きく成長した多くの霰が雲の下方向に向かって落下する状況が推測される．この場合、雲内の電荷分離（上部：氷晶＋，下部：霰－）が起こると推測され¹³⁾、その結果として、霰とともに雷の発生頻度が多くなったと考えられる．

次に、福岡と米子ともに、高層パターンの発生頻度が比較的大きい範囲Q（図-3）を見ると、強い西風～北西の風のパターンを含むが、範囲Pに比べて、上層の寒気流入が弱く、中層も乾燥しているため、雲は薄いと推測され、霰・雷の頻度が少なくなっている（表-1）．従って、この範囲では、雪や霽が主な降水粒子となる．

最後に、マップの右端の範囲Rは、福岡の特徴的な高層パターン（図-3, 表-1）を示し、中層が著しく乾燥している．その降水特性を見ると、雪・霽・霰・雷の発生頻度が非常に小さいことがわかる（図-4, 表-1）．即ち、中層が著しく乾燥した状況では、雲の対流活動が抑制され、範囲Qに比べて、さらに雲が薄くなっている状況が推測される．実際には、弱い北西風が卓越していることから、次節でも述べるように、朝鮮半島による筋雲の遮蔽効果が働いて、玄界灘上の対流活動が抑制されることを示す．

表-2 人工降雨実験 (S1~S5) の概略.

実験No	実施日	実施時間帯	雲厚(航空機観測)	天気概況(昼間)	天気概況(夜間)
S1	1999年2月2日	15~16時	2~3km	曇一時みぞれ	曇時々雪
S2	1999年3月22日	9~11時	数百m~1km	曇一時雨、みぞれを伴う	曇後晴
S3	2001年1月29日	7~9時	100~200m	晴後雨一時雪、雷・あられを伴う	曇一時雨、雷を伴う
S4	2002年1月28日	14時~17時	数百m	曇時々晴一時雪、みぞれを伴う	曇、みぞれを伴う
S5	2006年2月4日	9~10時	1km程度	晴一時雪	晴

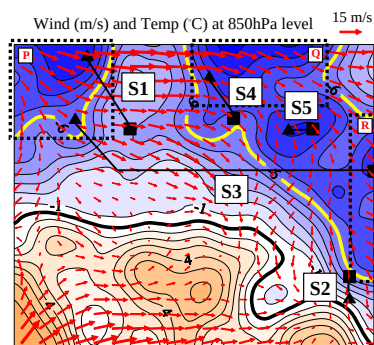


図-5 マップ上に分類された人工降雨実験日 (S1~S5) の気象条件. 黒色の四角と三角はそれぞれ9時と21時の高層パターンを示す.

(2) 人工降雨実施判断のための指針

前節の米子と福岡における、気象及び降水特性の結果に基づき、表-2に示した過去の人工降雨実験 (S1~S5) が、どのような高層パターンの中で実施されたのか (図-5)を確認し、図-6に示す実際の雲分布 (気象庁の可視画像) と対比しながら、北部九州で人工降雨を実施するための指針について検討する.

これまでの北部九州での実験は、図-5に示されるように、いずれも -6度線が既に流入している状況、または、そうすると予想できる状況下で実施されている. その気象条件は、殆ど降水をもたらさない範囲Rから、強い寒気が流入する範囲Pの高層パターンまで、マップ上に広く分布していることがわかった.

そこで、最初に、朝鮮半島による筋雲の遮蔽効果を確認するために、雲の様子 (図-6) を調べる. その結果、西風が卓越するS1や北北東~北の風が卓越するS2では、朝鮮半島による遮蔽を避けることができるため、それぞれ、東シナ海、日本海西部方面から筋雲が北部九州に流入している様子がわかる. いずれも、1km以上の厚さの雲が存在していた. 一方、S3~S5は、風向きが西北西から北西であり、朝鮮半島の遮蔽の効果を強く受けた. そのため、S3では、ほとんど雲がなく、S5では、北部九州沿岸域のみ雲が存在した. また、S4では、筋雲が対馬の南側から発生している状況で、実験領域では雲が薄かった. 以上から、風向きによって、朝鮮半島の遮蔽の効果を十分考慮する必要があることがわかった.

次に、飛行機の航行に影響する雷や強風の危険性を判断するために、上層の寒気流入について考察する. 北部九州では、その頻度は少ないが、S1の実験は、寒気の流入を特徴付ける範囲Pで実施された. この日の実験では、

離着陸に影響を与えるほどの強風にさらされ、雲は3km程度の厚さを持っていた. 前節で示したように、範囲Pでは、米子で雷の頻度が多く、福岡で少ないが、この条件に合致した場合には、雷の発生に注意しなければならない. また、S3でも、殆ど雲がない範囲Rの高層パターンの中で実験が実施されたが、仮に、その数時間後まで実験が継続されていれば、21時の高層パターン (範囲P) と玄界灘西部に現れた雲域 (図-6のS3の緑破線) が示すように、寒気流入の影響を受けた可能性があり、雷の発生に注意する必要があったと考えられる.

最後に、図-4、5に示されるように、福岡で雪と曇の頻度が比較的多い範囲Qは、S4の実験以外には実施した例がない. この範囲は、強風のパターンを含んでいるが、中層が乾燥していることから、厚さ1km以上で、あまり厚くなりすぎない程度の雲が存在し、雷の危険性が少ないと推測されるので、人工降雨実施のために適用すべき高層パターンと考えられる. しかし、S4の実験では、天気概況が雪や曇を伴う気象条件だったにも関わらず、予め設定していた実験領域 (図-6の水色の枠) が、筋雲が発生し始める先端部分に位置して、雲が薄く、自然でも人工でも降水を引き起こすことはなかった. その意味で、フライト計画の際に必要な実験領域の設定や、実施のタイミングなども十分検討しておく必要がある.

5. 結論

本研究では、北部九州を対象に、冬型の気象条件に対応した人工降雨実験の実施判断に関する指針を明らかにするために各種解析を行った.

まず、自己組織化マップを適用して冬季の気象条件をパターン分類し、降水特性と対応させた. その結果、北部九州では、冬型の気象状況を示していても、上層の強い寒気が流入する頻度は少なく、中層が乾燥する機会が多いことが要因となり、厚い積雲に特徴的な霰や雷の頻度が少なくなり、雪と曇からなる構成を示すことが多いことがわかった. また、北部九州が朝鮮半島に近いという地域的な特性から、風向きに依存して、朝鮮半島による筋雲の遮蔽効果を強く受けるため、降水が期待できない場合もあることがわかった.

次に、以上の北部九州における気象及び降水特性と、過去の人工降雨実験時の気象条件・雲分布に基づいて、人工降雨実験の実施判断の指針について考察した. その

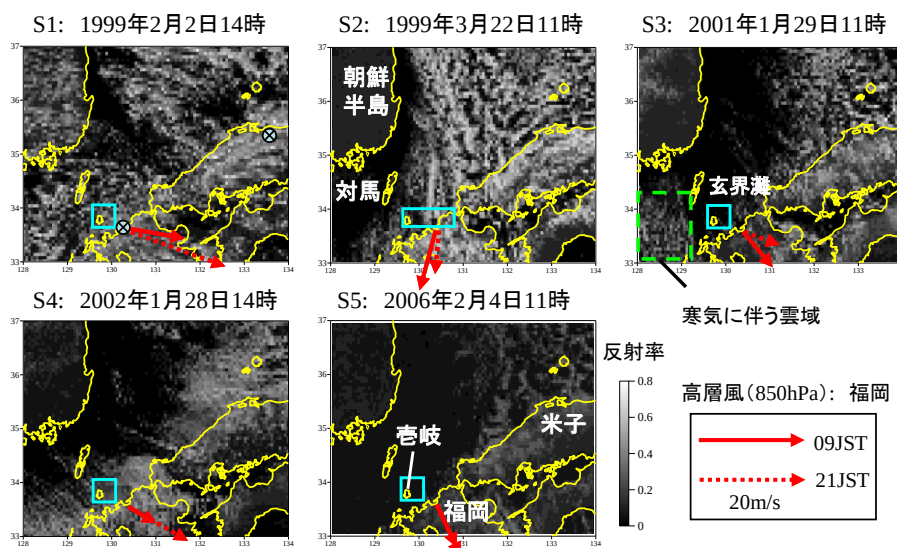


図-6 人工降雨実験 (S1~S5) 時の雲の分布 (可視画像) . 矢印は9時と21時の福岡の高層風データ (850hPa) . 水色の枠は実験域を示す.

結果, 自然でも人工でも降水が期待できない1km以下の薄い雲で実験を行わないためにも, 朝鮮半島による筋雲の遮蔽効果が働く風向きを考慮して, 人工降雨の実施を判断する必要があることがわかった. また, 北部九州では頻度が少ないが, 上層に寒気が流入する高層パターンを示す場合には, 強風の向きに依存して離着陸の際の危険を伴うことや, 厚い雲の発生に伴って飛行機に雷が落ちる危険性があり, 十分な注意が必要である.

最後に, 北部九州では, 雪や曇りが降る頻度が多い高層パターンが存在することがわかった. このパターンでは, 北西から西の風が卓越し, 中層が乾燥して, 厚い積雲が発生しにくいいため, 雷の発生は少なく, その危険を回避できると考えられる. このパターンで実施された実験は, 1度しかないため, 今後, 人工降雨実験の候補として十分考慮に入れるべきである.

謝辞: 九州大学と防衛大学校との共同研究を遂行するにあたり, 防衛省海上自衛隊厚木航空基地第51航空隊の関係者の皆様に対し, P3C対潜哨戒機を使用した多大な実験協力 (表-1のS3~S5) を頂きましたこと, ここに深く御礼申し上げます.

参考文献

- 1) List, L.: Weather modification -A scenario for the future, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.85, pp.51-63, 2004.
- 2) WMO: WMO statement on weather modification, WMO documents on weather modification approved by the commission for atmospheric sciences management groups, second session, Oslo, Norway, CAS-MG2/Doc. 4.4.1, 2007.
- 3) Hobbs, P.V.: Comments on 'A Critical Assessment of Glaciogenic Seeding of Convective Clouds for Rainfall Enhancement', *Bull.*

Amer. Meteor. Soc., Vol.82, pp.2845-2846, 2001.

- 4) Langno, A.L. and Hobbs, P.V.: Further analyses of the Climax Cloud-Seeding Experiments, *J. Appl. Meteor.*, Vol.32, pp.1837-1847, 1993.
- 5) Huff, F.A. and Semonin, R.G.: Potential of precipitation modification in Moderate to severe droughts, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 14, pp. 974-979, 1975.
- 6) Huff, F.A.: Climatological assessment of natural precipitation characteristics for use in weather modification, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 8, pp. 401-410, 1969.
- 7) Kohonen, T.: Self-Organizing Maps, *Springer Series in Information Sciences*, Vol. 30, 1995.
- 8) Fukuta, N. Wakimizu, K. Nishiyama, K. Suzuki, Y. Yoshikoshi, H.: Large unique radar echoes in a new, self-enhancing cloud seeding, *Atmospheric Research*, Vol. 55, pp. 271-273, 2000.
- 9) 吉田祐一, 村上正隆, 棚澤義一, 加藤輝之, 橋本明弘, 山崎剛, 羽田紀行: 渇水対策としての人工降雪効果の試算, 水文・水資源学会誌, 22巻3号, pp. 209-222, 2009.
- 10) Nishiyama, K. Endo, S. Jinno, K. Uvo, C.B. Olsson, J. and Berndtsson, R.: Identification of typical synoptic patterns causing heavy rainfall in the rainy season in Japan by a self-organizing map, *Atmospheric Research*, Vol.83, pp.185-200, 2007.
- 11) 西山浩司, 遠藤伸一, 神野健二, 河村 明: 自己組織化マップを利用した梅雨期特有の気象場の分類, 水工学論文集, 49, pp.241-246, 2005.
- 12) 福田矩彦: 気象工学 - 新しい気象制御の方法 -, 気象研究ノート, 気象学会, Vol. 164, 213 pp, 1988.
- 13) 高橋 勲: 雲の物理, 東京堂出版, 172 pp, 1987.

(2009. 9. 30受付)